

6. Казакова О.А., Заворин А.С., Казаков А.В. Состав неорганической части угля Таловского месторождения Томской области // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 4. – С. 49–52.
7. Заворин А.С. Состав и термические свойства минеральной части бурых углей (теплотехнический аспект). – Новосибирск: ИТ СО РАН, 1997. – 187 с.
8. Заворин А.С., Раков Ю.Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 1. – С. 144–150.
9. Алехнович А.Н., Дик Э.П. Методические рекомендации по исследованию шлакующих и загрязняющих свойств углей. – Челябинск: Урал ВТИ, 1998. – 66 с.
10. Белов С.Ю., Рундыгин Ю.А. Прогноз склонности твердого топлива к загрязнению поверхностей нагрева парогенераторов связанными отложениями // В сб.: Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов. – Таллин, 1980. – Т. А. – С. 145–150.
11. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Температурные условия начала шлакования при сжигании углей с кислым составом золы // Теплоэнергетика. – 1988. – № 1. – С. 34–38.
12. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Выбор температуры газов на выходе из топки по условиям шлакования // Теплоэнергетика. – 1994. – № 8. – С. 23–26.
13. Алехнович А.Н., Гладков В.Е., Богомолов В.В. Прогнозирование шлакования по химическому составу частичек летучей золы // Теплоэнергетика. – 1995. – № 8. – С. 23–28.
14. Алехнович А.Н., Богомолов В.В. Прогнозирование шлакующих и загрязняющих свойств углей по широкодоступным сведениям и результатам специальных исследований // В сб. докл.: Минеральная часть топлива, шлакование, загрязнение и очистка котлов. – Т. 1. – Челябинск: Изд-во УралВТИ, 1996. – С. 61–78.
15. Алехнович А.Н., Богомолов В.В., Гладков В.Е., Артемьева Н.В. Шлакование и образование отложений в газовом тракте котла // Теплоэнергетика. – 1997. – № 3. – С. 64–68.

Поступила 29.06.2011 г.

УДК 621.181:519.876

АНАЛИЗ ТОПОЧНОЙ СРЕДЫ КОТЛА БКЗ-210-140 НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.С. Заворин, Т.М. Бетхер, Б.В. Лебедев

Томский политехнический университет
E-mail: betkher.tm@gmail.com

Выполнено математическое моделирование топочной среды котла БКЗ-210-140 при сжигании непроектных марок углей. Получено соответствие результатов математического моделирования с расчетными и экспериментальными данными. Доказана адекватность математической модели, используемой в программном продукте FIRE 3D, применительно к пылеугольной технологии сжигания в топке с тангенциальной компоновкой горелок.

Ключевые слова:

Математическое моделирование, пакет прикладных программ, котел, концентрация кислорода, скорость аэросмеси, коэффициент избытка воздуха, температура дымовых газов.

Key words:

Mathematical modeling, package of applied programs, boiler, concentration of oxygen, speed of an aeromix, factor of surplus of air, temperature of smoke gases.

В последние годы при проектировании, исследовании и наладке котельного оборудования все более широко применяется математическое моделирование, основанное на физических законах, описывающих процессы аэродинамики и теплообмена [1, 2]. Компьютерное моделирование позволяет корректно изучить режимы работы и оптимизировать как вновь проектируемое, так и реконструируемое оборудование. Совместное использование математического моделирования, физического эксперимента и натурных испытаний дает возможность получить наиболее полную и достоверную информацию об объекте исследования. При этом существенно сокращаются затраты на проведение экспериментальных и опытных работ.

Целью данного исследования является апробация пакета прикладных программ FIRE 3D для котельного агрегата, реализующего тангенциально закрученную аэродинамику пылеугольного факела в топочной камере.

В качестве объекта исследования выбран котельный агрегат БКЗ-210-140Ф, который является одним из наиболее распространенных в России котлов для ТЭЦ (по данным завода-изготовителя, в период с 1960 по 1985 гг. выпущено около 220 котлов такого типа).

Топочная камера, имеющая в плане форму, близкую к квадрату, с размерами по осям экранных труб 7424×7808 мм, экранирована трубами диаметром 60 мм, расположенными с шагом 64 мм. Камера оборудована четырьмя прямоточными горелками, установленными в углах топки тангенциально к окружности диаметром 900 мм, расположенной по оси симметрии топки.

В качестве инструмента исследования применен пакет прикладных программ FIRE 3D, который позволяет производить расчет пространственной аэродинамики с учетом переноса тепла конвекцией и излучением при горении полидисперсного пылеугольного топлива в камерах сгорания

[1]. Результатами моделирования являются общая картина топочных процессов, поля изолиний важных теплофизических характеристик, параметры аэродинамики, горения, теплообмена, взаимодействия частиц с ограждающими поверхностями топочной камеры. Все это в совокупности дает возможность теоретического обоснования и прогнозирования развития происходящих процессов, корректировки конструкций топок и применения полученных результатов при модернизации действующих энергетических объектов.

Программный комплекс состоит из пяти приложений для стадийной обработки данных: Mesh Converter — для импорта расчетных сеток трехмерных геометрий из текстового формата; Mesh Creator — для моделирования сеток; Searcher и его разновидности под разные схемы системной части операционной системы — для расчета течений и теплообмена с возможностью применения лагранжева подхода для описания частиц и шлакоосаждения; Vision 3D — для визуализации конечного результата вычислений; Report Converter — преобразование отчетов вычисления для последующего анализа в электронных таблицах прохождения расчетов [2].

Исследования проводились для сжигания дальневосточного бурого угля с техническими характеристиками на рабочую массу: влажность 40,4 %; зольность 28,7 %; теплота сгорания 10859,3 кДж/кг; выход летучих 56 % (на горючую массу).

На первоначальном этапе исследования выполнен поверочный расчет котла с применением программы DEKE, разработанной на кафедре парогенераторостроения и парогенераторных установок Томского политехнического университета, с целью определения основных расходных, режимных и балансовых параметров. Получено, что эффективность использования топлива характеризуется значением КПД котла 87,49 %, при расходе топлива 13,6 кг/с. Температура газов на выходе из топки равна 1065 °С, что ниже допустимой (1100 °С) для заданного топлива, следовательно, отсутствует вероятность интенсивного шлакования поверхностей нагрева, расположенных за топкой. Тепловое напряжение топочного объема составляет 149,6 кВт/м³ и свидетельствует о том, что значение средней плотности тепловыделения в объеме топочной камеры находится в допустимых пределах. Установленная поверхность пароперегревателя обеспечивает заданную температуру перегрева пара

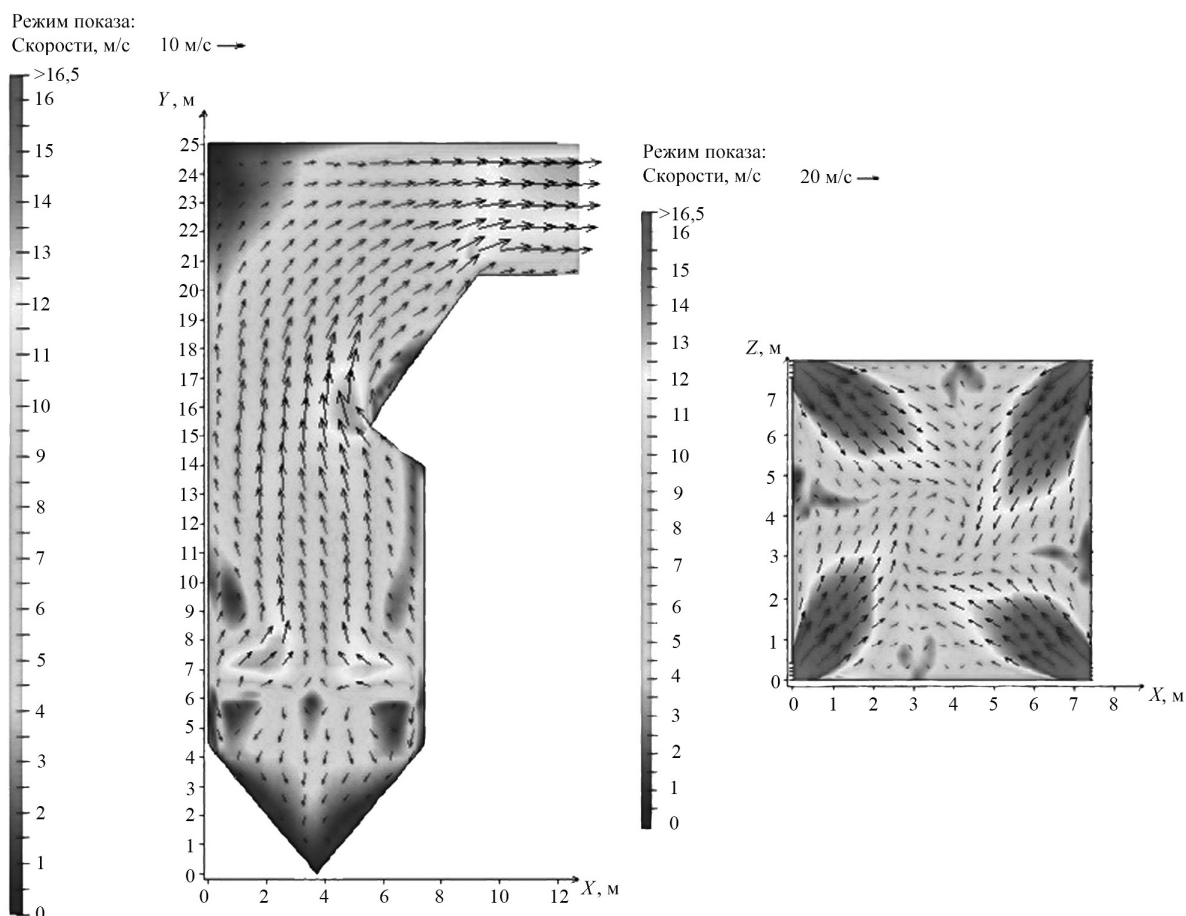


Рис. 1. Аэродинамическая структура потоков по сечениям топочной камеры: а) в вертикальном по оси топки; б) в горизонтальном по оси горелочных каналов вторичного воздуха

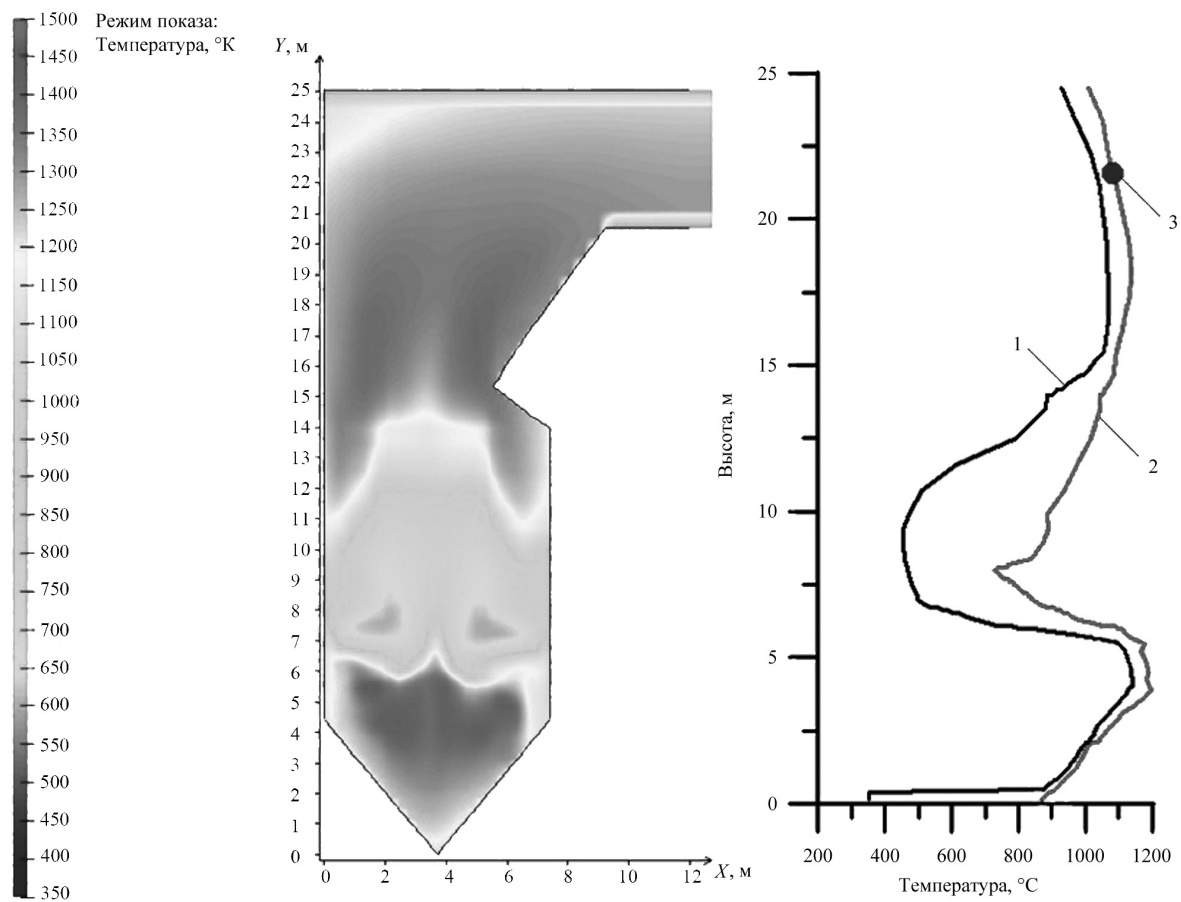


Рис. 2. Изменение температуры по высоте топочной камеры: а) визуализация поля в вертикальном сечении по оси топки; б) характерные значения в горизонтальных сечениях (1 – среднеинтегральный уровень; 2 – максимальный уровень; 3 – расчёт по нормативному методу [3])

при величине впрыска в пароохладителе до 10 %.

Для тестового исследования наиболее представительным является режим работы котельного агрегата на четырех мельницах при номинальной нагрузке. Соответствующие этому режиму данные о параметрах топочной среды представлены на рис. 1 и 2.

На уровне горелочного пояса (рис. 1) создаётся тороидальная зона с повышенными до 15...16 м/с скоростями завихрённого потока в горизонтальной плоскости, которая по мере восхождения вихря расширяется вплоть до экранированных стен и преобразуется в подъёмное движение со средней скоростью не более 8 м/с. За счёт изменения давления при соударении горелочных струй в нижней части топки также создаётся обширная зона перемещения продуктов сгорания, которая благоприятствует как интенсификации теплообмена с экранами в области холодной воронки, так и подводу тепла на начальном участке горелочных струй.

Несмотря на наличие аэродинамического выступа, предназначенного для выравнивания параметров потока продуктов сгорания на выходе в конвективный газоход, вблизи соединения фрон-

тового и потолочного экранов наблюдается застойная зона с низким уровнем массообмена (рис 1, а).

Теплотехнические характеристики топлива, по которым оно относится к низкосортным углям, являются причиной существенных затрат теплоты на прогрев пылеугольных частиц и испарение влаги, что, в свою очередь, приводит к снижению концентрации окислителя в зоне смесеобразования и задерживает тем самым воспламенение и процесс горения. Вследствие этого температура топочной среды на уровне горелочного пояса находится в пределах диапазона 700...1250 К (рис. 2).

Затягивание выгорания топливных частиц в условиях тангенциально закрученной структуры факела приводит к увлечению их в верхние и нижние объёмы топки, где и развиваются максимальные температуры (рис. 2). Несмотря на это высокая реакционная способность подсушенного угля обеспечивает за счёт интенсивного выгорания благоприятную для надёжной работы котла температуру продуктов сгорания на выходе из топки — не более 1350 К (рис. 2).

Выполненное тестовое моделирование показало хорошую сходимость с результатами, получен-

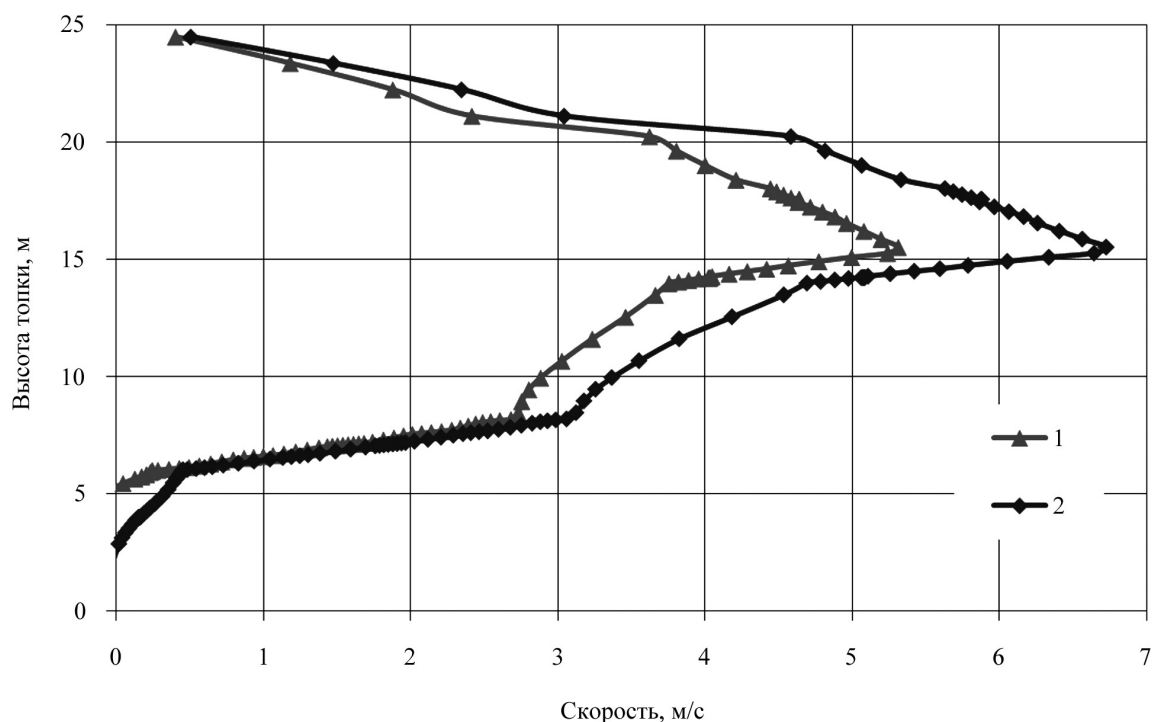


Рис. 3. Усреднённые значения подъёмной скорости дымовых газов по высоте топки. Работа на: 1) двух; 2) трёх горелках

ными как расчётным путём по нормативной методике теплового расчёта котельных агрегатов [3], так и при натурных экспериментах в процессе тепловых испытаний котла. Так, разница по значению температуры на выходе из топки не превышает 50°C и укладывается в допускаемые инженерными методиками отклонения. Значения скорости среды в соответствующих точках интенсивного движения по результатам численного моделирования составили $16...16,5$ м/с, а по результатам прямых измерений от 16 до $17,3$ м/с. Значения коэффициента избытка воздуха на выходе из топки, определённые при моделировании по концентрации кислорода, составило 1,21, в натурном эксперименте – $1,14...1,24$, а по нормативному методу теплового расчёта – 1,2. Эти данные свидетельствуют о достаточной адекватности используемой математической модели и расчётного метода при анализе процессов в топке с тангенциально закрученной вихревой аэродинамикой.

Практика эксплуатации котлов с такими топками при неполной нагрузке требует отключения части горелочных блоков. Имитация этих условий выполнена для вариантов задействования в работу трёх горелок при нагрузке котла 190 т/ч (рис. 3, в работе горелки А, Б и В) и двух горелок при нагрузке котла 130 т/ч. В последнем случае исследовался вариант с включением в работу противоположных по диагонали горелок (рис. 3, в работе горелки А и В). Для предотвращения смещения вихревого потока в обоих случаях через холостые горелки предусмотрен ввод остаточного воздуха.

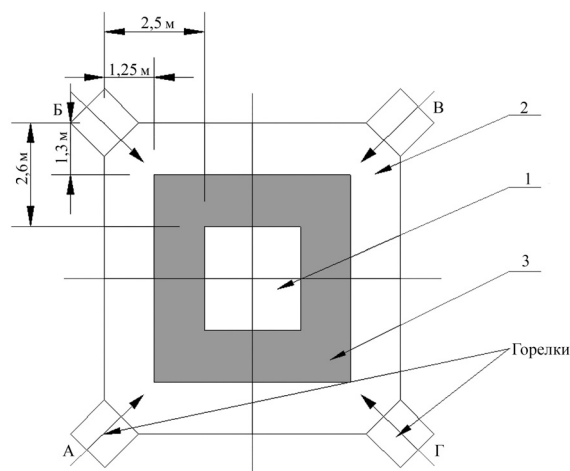


Рис. 4. Схема разделения объема топки на исследуемые области: 1) центральная; 2) пристенная; 3) промежуточная

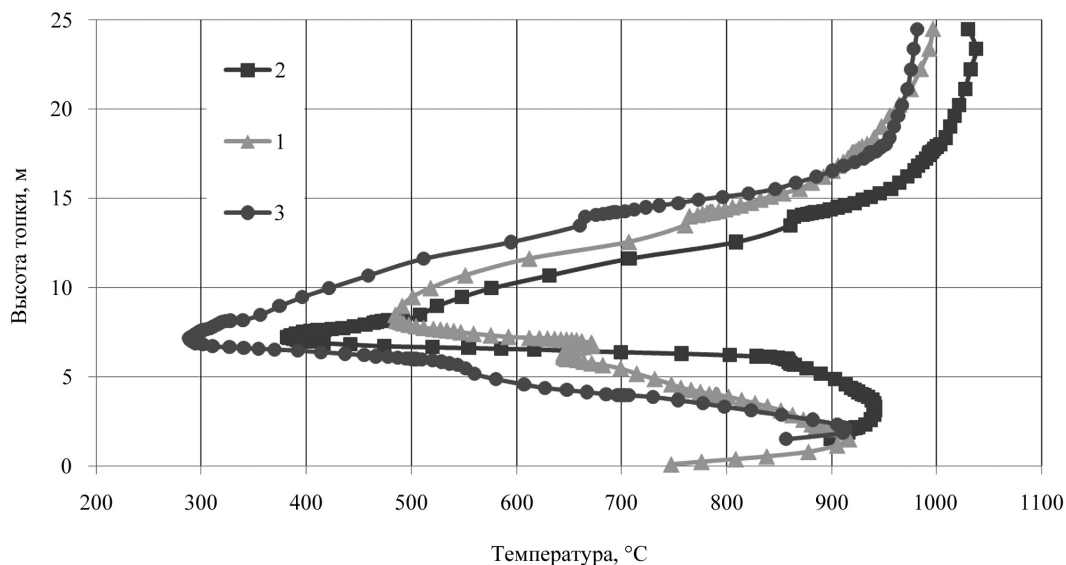
Изменение среднеинтегральной скорости подъёма продуктов сгорания при отключении по топливу одной и двух горелок (рис. 3) имеет одинаковый профиль и показывает, что скоростной режим существенно отличается в пространстве выше горелочного блока вплоть до поворота потока в горизонтальный конвективный газоход. Максимум усреднённой скорости подъёмного движения соответствует пережигу живого сечения в области аэродинамического выступа и составляет 5,3 м/с при двух работающих горелках и 6,7 м/с при трёх горелках. Эти данные свидетельствуют о возможно-

сти повышенной сепарации частиц из потока при работе котла на неполных нагрузках.

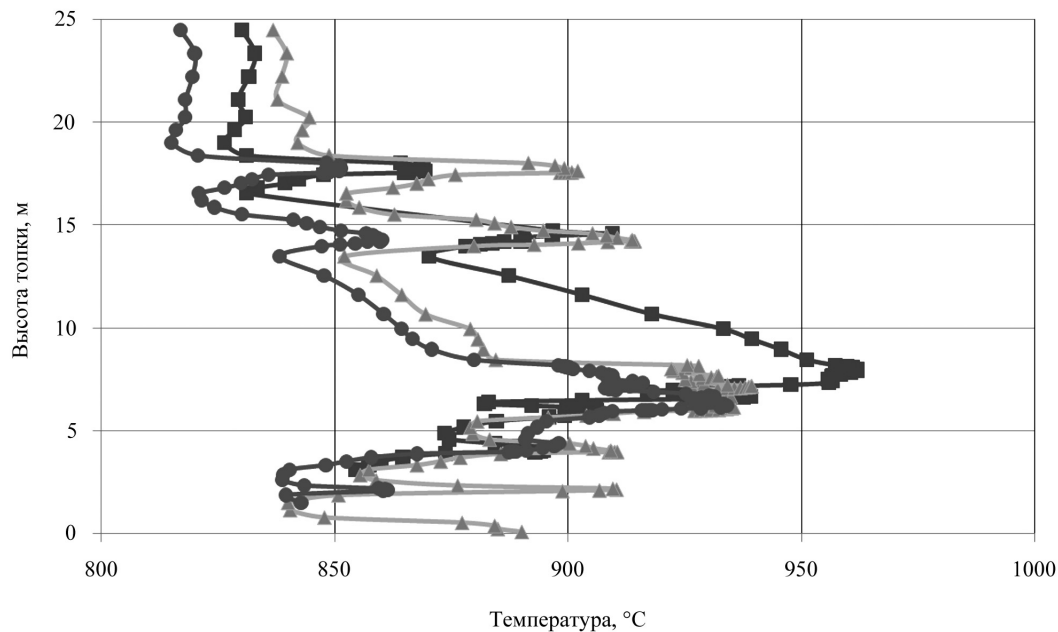
Натурные экспериментальные исследования по зондированию топочного объёма котла при сжигании бурого угля [4, 5] показали большое влияние аэродинамики на неравномерность распределения твёрдой фазы по сечению топki и дают основание считать её предпосылкой для наброса шлакозоловых частиц на радиационные экраны их поверхности нагрева и последующего снижения их тепловой эффективности. В связи с этим по результатам численного моделирования выпол-

нено изучение параметров среды в трёх разных областях топki, выделенных согласно схеме рис. 4: пристенная область – пространство, прилежащее к экранам на расстоянии 1,25...1,30 м; центральная область – призматическое пространство вдоль вертикальной оси топki со сторонами, отстоящими от экранов на расстояние 2,5...2,6 м; промежуточная область – пространство, заключённое между пристенной и центральной областями.

Можно видеть, что работа на трёх горелках (рис. 5, а) в целом при понижении температурного уровня воспроизводит профиль изменения темпе-



а



б

Рис. 5. Изменение температуры дымовых газов по высоте топki при работе на трёх (а) и двух (б) горелках. Области: 1) центральная; 2) пристенная; 3) промежуточная

ратуры при задействовании всех горелочных блоков (рис. 2, б). Это свидетельствует о сохранении условий для формирования вихревой структуры факела. Однако в пристенной области выделяются участки, в которых температура среды превышает развивающуюся в других областях. Это свидетельствует о смещении горящих частиц из центральной и промежуточной областей на периферию, примыкающую к экранам, и позволяет выделить эти участки как опасные по условиям шлакования. К ним относятся, прежде всего, экраны под горелочным поясом вблизи устья холодной воронки на высоте от 3 до 6 м, а также полоса по периметру топки на высоте от 15 до 17 м.

Переход на несение нагрузки на двух горелках (рис. 5, б) характеризуется скачкообразным изменением температуры. При этом протяжённость участков с преобладанием температурного уровня в пристенной области распространяется на обширную площадь экранов по высоте от 5 до 14 м. Это является следствием нарушения равномерной аэ-

родинамической структуры в топке и непригодности данного режима для обеспечения надёжной эксплуатации котла.

Выводы

1. Подтверждена адекватность математической модели, используемой в программном продукте FIRE 3D применительно к пылеугольной технологии сжигания в топке котла БКЗ-210-140Ф, что позволяет прогнозировать развитие внутритопочных процессов, выбирать и корректировать режимы работы котлов на непроектных видах топлива.
2. Определены потенциально опасные участки по условиям шлакования. Установлена непригодность режима работы котла на двух горелках из-за нарушения аэродинамической структуры в топке.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гиль А.В., Красильников С.В., Старченко А.В. Применение пакета прикладных программ FIRE-3D при реконструкции котельных агрегатов // Математическое моделирование и информационные технологии: Матер. VIII Всеросс. конф. молодых ученых. – Новосибирск, 2007. – С. 40–41.
2. Заворин А.С., Красильников С.В., Старченко А. В. Программный комплекс для расчета и визуализации трехмерных реагирующих турбулентных течений в топках котлов // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Докл. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 369–371.
3. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – СПб.: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
4. Маршак Ю.Л., Козлов С.Г. Исследование пристенной области топочных камер // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов: Тезисы докл. III Всес. конф. – Таллин, 1980. – Т. 1А. – С. 116–124.
5. Заворин А.С., Теплухин Е.П., Киселев Н.Б. Распределение минеральных компонентов бурого угля Березовского месторождения в пылеугольном тангенциально закрученном факеле // Известия вузов. Энергетика. – 1986. – № 3. – С. 89–92.

Поступила 30.09.2011 г.